Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 1, Spring - Summer 2019, p. 167-176

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۸، ص ۱۷۶-۱۶۷

مدل‌سازی و بهینه‌سازی انرژی مصرفی گاوآهن برگردان‌دار به روش سطح پاسخ

محمد مهریجانی[1]- جلال خدائی[2*]- سمیرا زارعی[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۳

چکیده

خاک‌ورزی به‌عنوان مرحله مقدماتی برای تولید محصولات کشاورزی، حجم بالایی از انرژی را مصرف می‌کند. با توجه به بحران انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی تمام تلاش‌ها بر آن است که مصرف انرژی تا حد ممکن کاهش یابد. هدف از این مطالعه بررسی اثر پارامترهای سرعت پیشروی، عمق شخم و رطوبت خاک بر میزان مصرف سوخت و نیروی کششی مورد نیاز طی عملیات شخم با گاوآهن برگردان‌دار سه خیش سوارشونده در خاکی با بافت رسی می‌باشد. آزمایش‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ مطابق با طرح مرکب مرکزی (CCD) با در نظر گرفتن سه سطح برای سرعت پیشروی تراکتور (۴، ۵ و ۶ کیلومتر بر ساعت)، سه سطح رطوبت خاک (۱۲، ۱۶ و ۲۰ درصد) و سه سطح عمق خاک‌ورزی (۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر) انجام گردید. از نرم‌افزار Design Expert 8.0.6 برای تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش استفاده شد. نتایج تجزیه و تحلیل آماری نشان داد، اثر عوامل عمق شخم، رطوبت خاک و سرعت پیشروی بر روی میزان مصرف سوخت و نیروی کششی مورد نیاز در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. متغیرهای مستقل به‌صورت معادلات رگرسیونی مرتبه دوم مدل‌سازی شدند و نقاط بهینه این متغیرها به‌دست آمد. بیشترین درصد مطلوبیت در سرعت پیشروی ۵/۰۸ کیلومتر بر ساعت، عمق شخم ۲۰ سانتی‌متر و رطوبت خاک۱۶/۴۱ درصد اندازه‌گیری شد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، تراکتور MF285، سوخت مصرفی، مدل رگرسیونی، نیروی کششی

مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و نیاز بیشتر به مواد غذایی، پیشرفت در بخش کشاورزی برای پاسخ‌گویی به نیازها، انرژی و توان بالاتری را برای افزایش تولیدات مطالبه می‌کند. ابزارهای خاک‌ورزی، انرژی را به‌طور مستقیم وارد خاک می‌کنند تا نتایج مطلوب که شامل برش، شکستن، برگرداندن و جابه‌جایی خاک است، حاصل شود. خاک‌ورزی یکی از اصلی‌ترین عملیات تاثیرگذار بر میزان مصرف انرژی ادوات و ایجاد هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی است (Mckyes, 1985). عملیات خاک‌ورزی در حدود نیمی از انرژی مورد استفاده در تولید محصول را به‌خود اختصاص می‌دهد (Kushwaha and Zhang, 1998)، از این رو بهینه‌سازی عملکرد ادوات خاک‌ورزی می تواند منجر به جلوگیری از اتلاف انرژی شود.

مرحله خاک‌ورزی با به همزدن خاک و نرم کردن آن محیط مناسبی برای استقرار و سبزشدن بذر، رشد و پراکنش ریشه، فراهم می‌گردد. در ضمن اگر عملیات خاک‌ورزی به‌طور صحیح و در زمان مناسب انجام گیرد، ساختمان خاک بهبود یافته، رطوبت خاک حفظ و نگه‌داری می‌شود. همچنین، تهویه خاک به‌خوبی انجام شده، نفوذپذیری خاک افزایش، علف‌های هرز، آفات و بیماری‌های گیاهی کاهش خواهد یافت.گاوآهن‌های برگردان‌دار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ادوات خاک‌ورزی می‌باشند. عملیات خاک‌ورزی در اکثر مناطق ایران به‌وسیله گاوآهن‌برگردان‌دار انجام می‌شود. توانایی این گاوآهن در برگرداندن خاک، شخم این وسیله را به‌گونه‌ای چشم‌گیر از بقیه گاوآهن‌ها متمایز ساخته است. این قابلیت امکان دفن بقایای گیاهی را در عمقی پایین‌تر از عمق بستر بذر فراهم و با زیر و رو کردن خاک، هوادهی و مخلوط شدن مواد غذایی با لایه توسعه ریشه را امکان‌پذیر می‌سازد. انرژی مصرفی در عملیات خاک‌ورزی، به عوامل مختلفی مانند نوع خاک و شرایط آن (رطوبت و بافت خاک)، عمق خاک‌ورزی، سرعت عملیات و نحوه اتصال ادوات به تراکتور بستگی دارد (Roozbeh *et al.*, 2003; Abbaspour-Gilandeh and Sedghi, 2013).

نتایج تحقیقات انجام شده ثابت می‌کند که با افزایش عرض تیغه

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان
(* - نویسنده مسئول: Email: J.khodaei@uok.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v9i1.65908

مقدار نیروی کششی مورد نیاز افزایش می‌یابد. علاوه بر عرض و عمق کار و خصوصیات هندسی ادوات، نوع و شرایط خاک از مهم‌ترین عوامل موثر بر میزان نیروی کششی ادوات می‌باشند (Godwin and O,Dogherty, 2006). در مطالعه‌ای دیگر گزارش شد که با افزایش سرعت پیشروی در هر نوع خاکی نیروی کششی افزایش می‌یابد و نیز عمق شخم و سرعتی که با آن عمل شخم انجام می‌شود را به‌عنوان دو فاکتور موثر و مهم در نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن‌برگردان‌دار معرفی کردند (Harrison and Reed, 1967). نتایج یک مطالعه دیگر نشان داد که با افزایش عمق خاک‌ورزی و سرعت پیشروی، نیروی کشش مورد نیاز برای کار گاوآهن چیزل در خاک ماسه‌ای افزایش می‌یابد (Al-Suhaibani and Ghaly, 2010). بررسی دیگری در زمینه بررسی نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن‌برگردان‌دار، تاثیر پارامترهایی نظیر رطوبت خاک، عمق شخم و سرعت پیشروی انجام شد (Rashidi *et al.*, 2013). نتایج این بررسی حکایت از معنی‌دار بودن اثر هریک از عوامل مذکور روی نیروی کششی گاوآهن داشت. به‌نحوی که با افزایش رطوبت خاک، نیروی کششی کاهش و با افزایش سرعت و عمق کاری، نیروی کششی افزایش یافته است.

نتایج تحقیقی در زمینه عملیات خاک‌ورزی، نشان داد که با افزایش عمق از ۱۵ به ۲۰ و ۱۵ به ۲۵ سانتی‌متر، میزان مصرف سوخت به‌ترتیب ۸/۶۴ و ۱۶/۰۵ درصد افزایش یافته است (Darabi *et al.*, 2012). نتایج یک بررسی دیگر در این زمینه نشان داد که کاهش نسبت عمق کار وسیله خاک‌ورز به عرض تیغه در ادوات خاک‌ورزی تا مقدار معینی باعث افزایش بازده انرژی مصرفی می‌گردد (Godwin, 2007).تاثیر سرعت پیشروی، عمق کار و پهنای تیغه گاوآهن قلمی بر مصرف سوخت تراکتور MF399 در مطالعه‌ای دیگر مورد بررسی قرار گرفت (Karparvarfard and Rahmanian-Koushkaki, 2010). آن‌ها با استفاده از روش تحلیل ابعادی رابطه‌ای جهت پیش‌بینی مصرف سوخت تراکتور به‌دست آوردند. نتایج نشان از عدم تفاوت معنی‌دار بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مصرف سوخت تراکتور داشت. در مطالعه‌ای دیگر، بررسی میزان مصرف سوخت در ادوات مختلف خاک‌ورزی نشان داد که این پارامتر به نوع ادوات، عمق خاک‌ورزی و میزان رطوبت خاک بستگی دارد. نتایج حاصل از تحقیق آن‌ها نشان داد که مصرف سوخت تراکتور هنگامی به حداقل مقدار خود می‌رسد که میزان رطوبت خاک برابر با ۱۹/۵۵ درصد باشد (Sirhan *et al.*, 2002). در تحقیق دیگری میزان سوخت مصرفی در عملیات خاک‌ورزی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که سوخت مصرفی در شخم با گاوآهن برگردان‌دار، گاوآهن بشقابی یا هرس دیسکی در یک خاک با رطوبت ۴/۳ درصد بر پایه خشک بیشتر از سوخت مصرفی در همان خاک با رطوبت ۷/۹ درصد بوده است (Bukhari *et al.*, 1990). نتایج مطالعه دیگری در مورد بهینه‌سازی مصرف سوخت عملیات شخم با گاوآهن چیزل در خاک‌های لومی نشان داد که بهترین عملکرد سیستم از نظر مصرف سوخت، در سرعت پیشروی ۲/۷۸ متر بر ثانیه حاصل می‌شود (Janulevicius *et al.*, 2013). بدیهی است به‌دست آوردن آگاهی و شناخت کافی از نیروی کششی و انرژی مورد نیاز ادوات خاک‌ورزی برای طراحی مناسب ادوات و ابزار، انتخاب و اتصال ابزار متناسب با قدرت منابع در دسترس برای تأمین توان و درنهایت انتخاب شرایط بهینه برای انجام عملیات از لحاظ توان، انرژی و هزینه ضروری است (Fazeli *et al.*, 2012). معمولاً بهینه‌سازی اهدافی مانند دستیابی به کمترین هزینه یا کمترین زمان صرف‌شده را در نظر دارد. روش سطح پاسخ روش مناسبی برای نیل به این هدف است. روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضی است که برای آنالیز و مدل‌سازی پاسخ‌های فرآیندهایی به‌کار می‌رود که پاسخ مورد نظر تحت تأثیر تعدادی از متغیرها قرار می‌گیرد. همچنین این روش ابزاری مفید در مطالعات بهینه‌سازی است (Giri and Prasad, 2007; Hosseinzadeh Samani *et al.*, 2016). این روش، روند طبیعی بهینه شدن فرآیند را پیش‌بینی خواهد کرد. با کمک این روش، تعداد آزمایش‌ها کاهش‌یافته و کلیه ضرایب مدل رگرسیون و اثر متقابل فاکتورها، قابل برآورد هستند. طرح‌های مرکب مرکزی، باکس بنکن و دهلرت[1] سه روش اصلی روش سطح پاسخ می‌باشند که در بین این سه طرح، طرح مرکب مرکزی از اعتبار بیشتری برخوردار است (Montgomery, 2008). گاوآهن برگردان‌دار یکی از ابزارهای خاک‌ورزی است که به‌طور گسترده توسط کشاورزان در خاک‌ورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور در این پژوهش به تعیین شرایط بهینه فرآیند خاک‌ورزی توسط گاوآهن‌های برگردان‌دار برای بهینه‌سازی عملیات شخم از نظر سوخت مصرفی و نیروی کششی مورد نیاز این دستگاه‌ها پرداخته می‌شود. از آنجا که بخش عمده‌ای از انرژی مصرفی در تولید محصولات به عملیات خاک‌ورزی اختصاص دارد لذا، آگاهی از مقادیر بهینه متغیرهای موثر در میزان انرژی مصرفی این عملیات می‌تواند تا حد زیادی به کاهش مصرف انرژی کمک کند. در تحقیق حاضر مدل‌های پیش‌بینی‌کننده میزان مصرف سوخت و نیروی کششی مورد نیاز در عملیات شخم با گاوآهن برگردان‌دار ارائه و سطوح بهینه متغیرها مشخص می‌شوند.

مواد و روش‌ها

محل و روش انجام آزمایش

این تحقیق به‌منظور بهینه‌سازی عملیات شخم با گاوآهن برگردان‌دار، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه کردستان در خاکی با بافت

1- Doehlert

رسی صورت گرفت. آزمایش‌های شخم با گاوآهن برگردان‌دار برای بررسی اثر متغیرهای سرعت پیشروی، عمق شخم و میزان رطوبت خاک بر توان کششی مورد نیاز دستگاه خاک‌ورز و مصرف سوخت تراکتور انجام گردید. بافت خاک در آزمایشگاه با روش هیدرومتری مورد آزمایش قرار گرفت و درصدهای رس، سیلت و شن اندازه‌گیری و از روی مثلث بافت خاک، بافت آن تعیین شد. بافت خاک مزرعه مورد آزمایش، رسی (۵۰ درصد رس، ۲۶ درصد سیلت و ۲۴ درصد شن) می‌باشد. برای اندازه گیری رطوبت خاک از دستگاه رطوبت‌سنج مدل BOO7FMVOVK استفاده گردید. برای ایجاد رطوبت مناسب در هنگام آزمایش، مزرعه به مدت سه روز به روش بارانی آبیاری شد. رطوبت خاک چهار روز پس از آبیاری به حد رطوبت ۲۰ درصد رسید و اولین سری آزمایشات انجام شد. دو روز پس از آبیاری رطوبت به ۱۶درصد و پس از ۴ روز رطوبت به ۱۲درصد رسید و مرحله دوم و سوم آزمایشات صورت گرفت.

برای انجام آزمایشات شخم از یک دستگاه گاوآهن برگردان‌دار سه خیشه یک‌طرفه استفاده شد که عرض کار آن یک متر و عمق کار ماکزیمم آن ۳۰ سانتی‌متر می باشد. این ابزار خاک‌ورز دارای یک عدد چرخ تثبیت عمق است که توسط بازوی عمودی قابل تنظیم، در یک طرف شاسی قرار گرفته است. یک تراکتور MF285 برای انجام عملیات خاک‌ورزی و نیز یک تراکتور یونیورسال U650 به‌عنوان تراکتور کشنده مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدای هر آزمایش برای تنظیم عمق و سرعت که در نظر گرفته شده بود فاصله‌ای به اندازه ۱۰ متر طی شده و سپس داده‌برداری در فاصله‌ای به طول ۲۰ متر آغاز می‌شد.

برای اندازه‌گیری نیروی کششی موردنیاز از دو تراکتور و یک دینامومتر استفاده گردید. به‌طوری که دینامومتر از یک طرف به مالبند تراکتور جلویی و از طرف دیگر به جلوی تراکتور عقبی متصل شد و خاک‌ورز مربوطه به سیستم اتصال سه‌نقطه تراکتور عقبی متصل گردید. با حرکت تراکتور جلویی در مزرعه با سرعت مشخص که با GPS کنترل می‌شد، میزان نیروی کششی مورد نیاز برای کشیدن خاک‌ورز و تراکتور رابط توسط دینامومتر اندازه‌گیری شد و به‌وسیله یک دیتالاگر دیجیتالی مقادیر آن ثبت گردید. سپس نیروی مورد نیاز جهت کشیدن تراکتور عقبی بدون اتصال خاک‌ورز نیز اندازه‌گیری شده و با تفاضل این مقدار نیرو از نیروی کششی کل، نیروی مورد نیاز (F) جهت کشیدن خاک‌ورز به‌دست آمد. دینامومتر مذکور ظرفیت تحمل باری حدود ۱۰ تن را دارا می‌باشد و از نوع نیروسنج‌های مالبندی بر پایه کرنش‌سنج می‌باشدکه برای اندازه‌گیری نیرو، از تغییرات مقاومت الکتریکی کرنش‌سنجها به‌عنوان عنصر حساس به نیرو استفاده می‌کند.

برای اندازه‌گیری مقدار مصرف سوخت تراکتور حین انجام عملیات، از اندازه‌گیری سطح گازوئیل در سیستم باک جداگانه نصب شده بر روی سیستم سوخت‌رسانی تراکتور استفاده شد. سیستم باک جداگانه از استوانه‌ای مدرج، محافظ استوانه و اتصالات برای ورود و خروج گازوئیل تشکیل شده است. حجم کل این باک با توجه به ارزیابی به عمل آمده برای مسیر مورد نظر در حدود یک لیتر است. باک مدرج پر شده و در هر یک از سطوح، مدت زمان آزمایش ثبت و موتور تراکتور خاموش شد. سپس میزان سوخت مصرفی اندازه‌گیری شد (Rezapour-Sarabi *et al.*, 2015).

به‌منظور بهینه‌سازی کار گاوآهن برگردان دار با استفاده از روش سطح پاسخ، از طرح مرکب مرکزی[1] در قالب مرکز وجهی[2] با ۲۰ تیمار استفاده شد. در حالت مرکز وجهی حدود بیشینه و کمینه با کد سطح‌های (۱+) و (۱−) مشخص می‌شوند که با توجه به مطالعات و ایده پژوهش، برای سطوح هر متغیر باید در نرم‌افزار تعریف شوند (جدول ۱). به این ترتیب سطح دوم به‌عنوان سطح صفر یا مرکزی (۰)، مقداری بین کمینه و بیشینه است. تیمارهای مورد آزمایش در جدول ۲ معرفی شده‌اند. در این آزمون کلیه تجزیه و تحلیل‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ در محیط نرم‌افزار آماری Design Expert 8.0.6 انجام شد.

پس از انتخاب طرح، معادله مدل تعیین شده و ضرایب آن پیش‌بینی می‌شوند. مدل استفاده شده در روش سطح پاسخ عموماً، معادله مدل درجه دوم کامل یا فرم کاهیده آن است. مدل درجه دوم می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

در رابطه (۱)، β_0، β_i، β_{ii} و β_{ij} به‌ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه دوم و اثر متقابل رگرسیون هستند. x_i و x_j متغیرهای مستقل کد شده هستند. ε باقیمانده یا خطای مدل است. k شمارنده متغیرها است که از عدد ۲ شروع می‌شود. i و j اندیس‌های متغیرهای مستقل می‌باشند و i کوچک‌تر از j است.

پس از تعیین ضرایب معادله فوق، پاسخ پیش‌بینی می‌شود. سپس باید مطابقت مدل با داده‌های آزمایش مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار روش‌های متعددی نظیر تحلیل باقیمانده، ریشه میانگین مربعات خطاهای پیش‌بینی شده و آزمون عدم تطابق وجود دارد. قابلیت پیش‌بینی کلی مدل توسط ضریب تبیین (R^2) بیان شد و معنی‌داری آن از نظر آماری به‌وسیله آزمون آماری فیشر (*F-Value*) مشخص گردید.

1- Central composite design
2- Face centered

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل با استفاده از روش سطح پاسخ (طرح مرکب مرکزی، ۲۰ آزمایش)

Table 1- Independent variable levels using response surface methodology (Central composite design, 20 experiments)

Independent parameter	-1	0	+1
Plow depth (cm)	20	25	30
Forward speed (kmh^{-1})	4	5	6
Soil moisture (%)	12	16	20

جدول ۲- مشخصات تیمارها برای آزمایشات نیروی کششی مورد نیاز و میزان مصرف سوخت

Table 2- Treatment specification for the tensile force and fuel consumption tests

Treatment number	Plow depth (cm)	Forward speed (kmh^{-1})	Soil moisture (%)
1	25	5	16
2	30	6	20
3	20	6	20
4	30	4	20
5	30	5	16
6	25	5	12
7	25	6	16
8	25	5	16
9	25	5	16
10	25	5	16
11	30	4	12
12	20	5	16
13	20	6	12
14	25	5	16
15	20	4	20
16	20	4	12
17	25	5	16
18	30	6	12
19	25	5	20
20	25	4	16

نتایج و بحث

میزان سوخت مصرفی

نتایج تجزیه واریانس برای ارزیابی اثر عوامل عمق شخم، رطوبت خاک و سرعت پیشروی بر روی سوخت مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است. با مراجعه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که تأثیر عمق، سرعت پیشروی و رطوبت خاک و نیز اثر متقابل سرعت پیشروی و رطوبت بر مصرف سوخت در عملیات خاک‌ورزی با گاوآهن برگردان‌دار معنی‌دار می‌باشد.

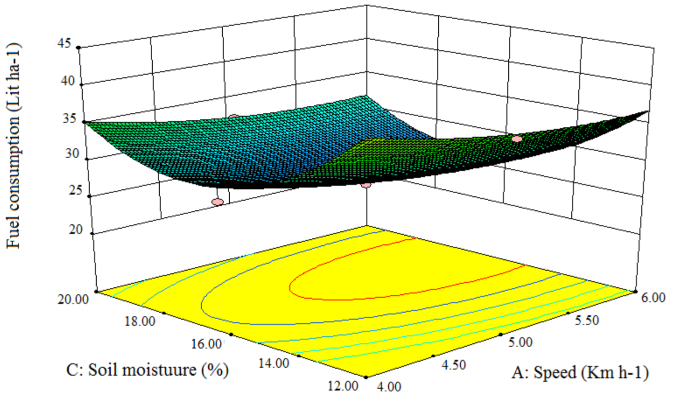
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر سرعت، عمق و رطوبت بر روی سوخت مصرفی تراکتور

Table 3- The result of the analysis of variance for the effect of forward speed, plow depth and soil moisture content on the fuel consumption of tractor

Source	Sum of square	df	Mean square	F value
Model	11.61	7	1.29	93.37**
Speed	0.7	1	0.7	50.84**
Depth	3.72	1	3.72	269.58**
Moisture	1.82	1	1.82	131.49**
Speed×Depth	3.015×10^{-3}	1	3.015×10^{-3}	0.22^{ns}
Speed×Moisture	0.042	1	0.042	4.47*
Depth×Moisture	0.018	1	0.018	1.31^{ns}
Speed×Depth×Moisture	7.384×10^{-3}	1	7.384×10^{-3}	0.53^{ns}
Error	0.33	28	0.015	–
Total	11.98	35	–	–

**: Significant at 0.01probability level, *: Significant at 0.05 probability level, ns: Non-significant

شکل ۱ مصرف سوخت را در رطوبت و سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش سرعت پیشروی میزان مصرف سوخت کاهش یافته است. کم‌ترین میزان مصرف سوخت با مقدار ۲۴ لیتر بر هکتار، در سرعت ۶ کیلومتر بر ساعت، عمق ۲۰ سانتی‌متری و رطوبت ۱۶ درصد و بیش‌ترین میزان مصرف سوخت با مقدار ۴۹ لیتر بر هکتار، در سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت، عمق ۳۰ سانتی‌متر و رطوبت ۱۲ درصد مشاهده شد.



شکل ۱– روند تغییرات مصرف سوخت در رطوبت و سرعت‌های مختلف

Fig. 1. The variation in fuel consumption of tractor in the different moisture contents and forward speeds

علت کاهش مصرف سوخت با افزایش سرعت پیشروی، انجام سریع عملیات در واحد سطح می‌باشد. بدین معنی که با افزایش سرعت پیشروی، عملیات خاک‌ورزی سریع‌تر انجام گرفته و مصرف توان مالبندی کم‌تر در واحد سطح و زمان موجب کاهش انرژی و سوخت کم‌تر در واحد سطح می‌گردد. نتایج اثر پارامترهای مورد بررسی روی مصرف سوخت در این پژوهش با نتایج به‌دست آمده از تحقیق مشابه مطابقت دارد (Roozbeh *et al.*, 2003). همچنین بعضی از محققین بهترین استراتژی برای بالا بردن بازده تراکتور و کاهش مصرف سوخت را استفاده از سرعت‌های بالاتر برای عملیات مزرعه دانسته و عنوان نموده‌اند که حتی با افزایش سرعت نیز، میزان مصرف سوخت در سرعت بالاتر کمتر از سرعت پایین می‌باشد (Matthes *et al.*, 1988; Darabi *et al.*, 2012).

مصرف سوخت نسبت به تغییرات رطوبت، روندی متفاوت داشت به گونه‌ای که در شخم با گاوآهن‌برگردان‌دار، مصرف سوخت با افزایش رطوبت ابتدا روند کاهشی و سپس افزایشی داشت (شکل ۱). با کاهش رطوبت از ۱۶ به ۱۲ درصد، مصرف سوخت به اندازه ۹ لیتر در هکتار افزایش یافت. علت آن احتمالاً به دلیل افزایش استحکام ذرات خاک ناشی از کاهش رطوبت (قوی‌تر شدن نیروی همدوسی بین ذرات) بود که نیاز به صرف انرژی بیش‌تری برای برش خاک داشت و این امر در تحقیق دیگری نیز مشهود بود (Kheiralla, 2004).

شکل ۲، میزان سوخت مصرفی تراکتور را هنگام کار با گاوآهن برگردان‌دار در عمق های ۲۰، ۲۵ و۳۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود گاوآهن برگردان‌دار مورد نظر در اتصال به تراکتور در سرعت ۵ کیلومتر بر ساعت و رطوبت ۱۶ درصد، هنگام کار در عمق‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متری به‌ترتیب ۲۴/۶، ۲۸ و ۳۴ لیتر در هکتار سوخت مصرف می‌کرد. با افزایش عمق از ۲۰ به ۲۵ سانتی‌متر (افزایش ۵ سانتی‌متری در عمق) میزان مصرف سوخت ۱۳/۸۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین زمانی‌که عمق از ۲۰ سانتی‌متر به اندازه ۱۰ سانتی‌متر افزایش یافته و به عمق ۳۰ سانتی‌متری می‌رسد، افزایش ۳۸/۲۱ درصدی در مصرف سوخت مشاهده می‌شود.

همچنین با انجام آنالیز رگرسیون چند متغیره، مدل چندجمله‌ای درجه دوم برای پیش‌بینی میزان مصرف سوخت به صورت زیر به‌دست آمد.

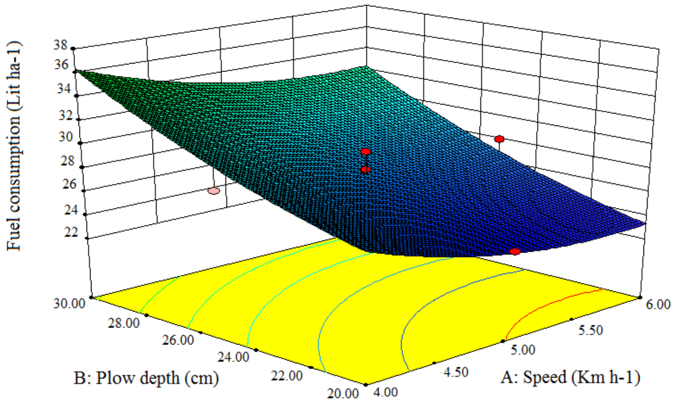
$$FC= 19.11 - 0.31A - 0.21B - 1.28C + 0.00224 \cdot AB - 0.010AC - 0.00137BC + 0.026A^2 + 0.00608B^2 + 0.04C^2 \quad (۲)$$

که در آن FC: مصرف سوخت (لیتر بر هکتار)، A: سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت)، B: عمق شخم (سانتی‌متر) و C: رطوبت خاک بر حسب درصد می‌باشد.

نیروی کششی مورد نیاز

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مربوط به نیروی کششی گاوآهن‌برگردان‌دار در سطوح مختلف سرعت، عمق و رطوبت خاک در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که هر سه عامل سرعت، عمق و رطوبت تاثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر روی نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن

برگردان‌دار دارند.



شکل ۲- روند تغییرات مصرف سوخت در عمق و سرعت‌های مختلف

Fig. 2. The variation in the fuel consumption of tractor in the different plow depths and forward speeds

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس اثر سرعت، عمق و رطوبت بر روی نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن

Table 4- The result of the analysis of variance for the effect of forward speed, plow depth and soil moisture content on the moldboard plow the required tensile force of

Source	Sum of square	df	Mean square	F value
Model	12.52	7	1.39	52.57**
Speed	0.97	1	0.97	36.69**
Depth	8.54	1	8.54	322.60**
Moisture	0.39	1	0.39	14.70**
Speed×Depth	8.906×10^{-4}	1	8.906×10^{-4}	0.034^{ns}
Speed×Moisture	6.678×10^{-4}	1	6.678×10^{-4}	0.025^{ns}
Depth×Moisture	2.632×10^{-3}	1	2.632×10^{-3}	0.099^{ns}
Speed×Depth×Moisture	1.452×10^{-3}	1	1.452×10^{-3}	0.61^{ns}
Error	0.65	28	0.03	–
Total	13.23	35	–	–

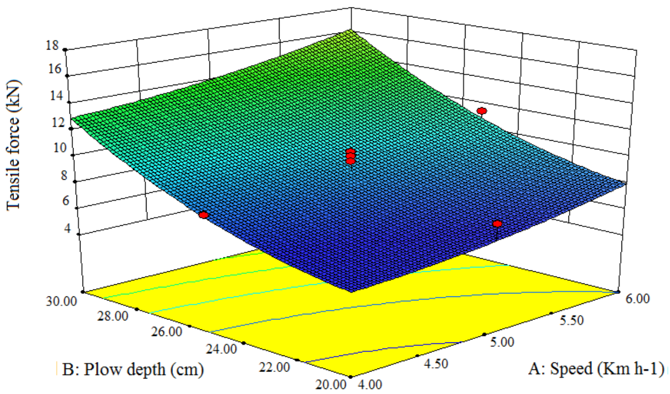
**: Significant at 0.01probability level, ns: Non-significant

شکل ۳ روند تغییرات نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن برگردان‌دار در عمق و سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این نمودارها، با افزایش عمق شخم، نیروی کششی افزایش معنی‌داری پیدا می‌کند. با افزایش عمق شخم به اندازه ۱۷ درصد، نیروی کششی به اندازه ۱۳/۴۶ درصد و به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بنابراین، در محدوده عمق مورد آزمایش، نیروی کششی به‌طور خطی با عمق افزایش یافت. این یافته با نتایج تعدادی از محققین که در تحقیقات خود تغییرات نیروی کششی با افزایش عمق را به‌صورت خطی گزارش نموده‌اند هم‌خوانی دارد (Loghavi and Moradi, 1996).

بیشترین میزان میانگین نیروی کششی با ثابت در نظر گرفتن سرعت و رطوبت، در عمق۳۰ سانتی‌متر و کمترین آن در عمق ۲۰ سانتی‌متر به‌دست آمد. در توجیه این روند می‌توان گفت با افزایش عمق خاک‌ورزی، خاک به‌طور طبیعی متراکم گشته و باعث افزایش مقاومت مکانیکی خاک شده و به تبع آن، افزایش نیروی کششی را به‌دنبال خواهد داشت که با نتایج سایر محققین مطابقت دارد (Earl, 1997). دلیل دیگر افزایش نیروی کششی تراکتور، می‌تواند این باشد که افزایش عمق باعث افزایش سطح گسیختگی، حجم و وزن خاک جابه‌جا شده گردیده و نیروی بیشتری برای برش آن لازم است. زیاد شدن وزن خاک و تراکم آن روی صفحه برگردان باعث افزایش فشار جانبی بر روی گاوآهن شده و منجر به افزایش نیروی اصطکاک کفش خیش‌ها با دیواره شیار می‌گردد. در نتیجه نیروی کششی تراکتور و مقاومت کششی گاوآهن افزایش می‌یابد با نتایج سایر محققین مطابقت دارد (Saunders *et al.*, 2000).

بر اساس شکل ۳، با افزایش سرعت پیشروی، نیروی کششی افزایش معنی‌داری پیدا کرده است. این پدیده عمدتاً به دلیل شتاب بیشتری است که هر نوع خاک در صورت جابه‌جایی سریع‌تر آن به‌خود می‌گیرد. شتاب گرفتن خاک حداقل به دو دلیل مقاومت

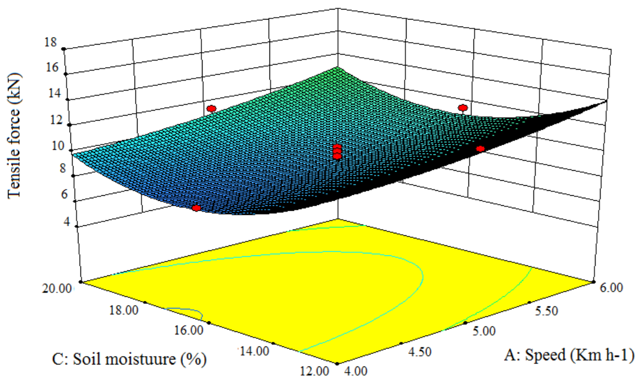
کششی را افزایش می‌دهد، یکی به این علت که بارهای عمودی بر روی سطح درگیر با خاک را افزایش داده و از این طریق مقاومت اصطکاکی را افزایش می‌دهند و علت دیگر انرژی جنبشی اعمال شده به خاک می‌باشد که با نتایج سایر محققین (Kepneret al., 1987; Rashidiet al., 2013) مطابقت دارد.



شکل Error! No text of specified style in document.– روند تغییرات نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن برگرداندار در عمق و سرعت‌های مختلف

Fig. 3. The variation in the required tensile force of moldboard plow in the different plow depths and forward speeds

شکل ۴ روند تغییرات نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن برگرداندار در رطوبت و سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش میزان درصد رطوبت خاک، نیروی کششی تراکتور روند یکنواختی ندارد. با توجه به این نمودار، کمترین میزان نیروی کششی تراکتور در میزان رطوبت ۱۶ درصد و بیشترین مقدار آن در محدوده رطوبتی ۱۲ درصد رخ داده است. هرچه فاصله بین دو ذره رسی یا خاکدانه کمتر باشد، نیروی همدوسی بین آن‌ها بزرگتر می‌شود. این در خاک‌های خشک، به حداکثر رسیده و با افزودن آب به خاک کاهش می‌یابد، زیرا مولکول‌های آب در بین ذرات خاک قرار گرفته و فاصله بین آن‌ها را افزایش می‌دهند (Kamakar *et al.*, 2009).



شکل ٤– روند تغییرات نیروی کششی مورد نیاز گاوآهن برگرداندار در رطوبت و سرعت‌های مختلف

Fig. 4. The variation in the required tensile force of moldboard plow in the different moisture contents and forward speeds

افزایش نیروی کششی تراکتور با افزایش میزان رطوبت (۱۶ به ۲۰ درصد) را می‌توان ناشی از تاثیر نیروهای دگردوسی بر افزایش ضریب اصطکاک ظاهری فلز و خاک و قرار گرفتن خاک در مرحله دگردوسی دانست که محققین دیگر نیز به این نتیجه رسیده‌اند (Hemmat and Adamchuk, 2008; Zhao *et al.*, 2009). با افزایش بیشتر رطوبت خاک، غشای رطوبتی شکل‌گرفته بین ذرات

خاک توسعه بیشتری یافته و با قرار گرفتن بین ذرات خاک و سطوح فلزی موجب افزایش نیروی دگردوسی بین ذرات خاک و سطوح درگیر با خاک ادوات خاک‌ورزی می‌گردد و باعث افزایش مجدد مقاومت کششی می‌شود. همچنین با توجه به نوع بافت خاک در یک محدوده رطوبتی با افزایش رطوبت، خاصیت تردی خاک کاهش می‌یابد و خاک رفتار خمیری پیدا می‌کند.

با انجام آنالیز رگرسیون چندمتغیره، مدل چندجمله‌ای درجه دوم برای پیش‌بینی میزان مصرف سوخت به‌صورت زیر به‌دست آمد.

$$F = 10.42 - 0.101A - 0.101B - 0.949C + 0.00121AB - 0.00131AC + 0.00523\ BC + 0.029A^2 + 0.00404B^2 + 0.028C^2 \quad (۳)$$

که در آن F: نیروی کششی (کیلو نیوتن)، A: سرعت پیشروی (کیلومتر بر ساعت)، B: عمق شخم (سانتی‌متر) و C: رطوبت خاک بر حسب درصد می‌باشد.

برای تعیین نقاط بهینه سرعت پیشروی، عمق شخم و رطوبت خاک اهداف بهینه‌سازی به‌صورت کمینه کردن میزان نیروی کششی لازم و نیز کمینه کردن میزان مصرف سوخت تعیین گردید. نقاط بهینه سرعت، عمق و رطوبت در محدوده تعریف شده، به‌ترتیب ۵/۰۸ کیلومتر بر ساعت، ۲۰ سانتی‌متر و ۱۶/۴۱ درصد با درصد مطلوبیت ۰/۹۰۴ محاسبه شد. مصرف سوخت و نیروی کششی لازم مقادیر بهینه برای سطوح بهینه متغیرهای مورد مطالعه به‌ترتیب برابر با ۲۵/۰۷ لیتر بر هکتار و ۶/۳۹ کیلونیوتن برآورد گردید.

نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

با افزایش عمق شخم، نیروی کششی و مصرف سوخت افزایش پیدا می‌کند. به طوری که با افزایش عمق از ۲۰ به ۲۵ سانتی‌متر میزان مصرف سوخت ۱۳/۸۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین زمانی که عمق از ۲۰ سانتی‌متر به عمق ۳۰ سانتی‌متر افزایش یافت، افزایش ۳۸/۲۱ درصدی در مصرف سوخت مشاهده گردید. همچنین رابطه بین عمق کار و مقاومت کششی گاوآهن‌برگردان‌دار به‌صورت خطی تغییر می‌کند.

با افزایش سرعت پیشروی، نیروی کششی مورد نیاز عملیات شخم افزایش پیدا می‌کند اما این افزایش به شدت تاثیر عمق شخم نبود و باعث کاهش سوخت مصرفی شد.

با افزایش میزان رطوبت خاک، تغییرات نیروی کششی تراکتور روند یکنواختی ندارد. کمترین میزان نیروی کششی تراکتور در میزان رطوبت ۱۶ درصد و بیشترین مقدار آن در محدوده رطوبتی ۱۲ درصد اندازه‌گیری شد.

مدل‌های رگرسیونی درجه دوم به‌دست آمده به‌خوبی می‌توانند نیروی کششی مورد نیاز و سوخت مصرفی را پیش‌بینی کنند.

با استفاده از روش سطح‌پاسخ، نقاط بهینه سرعت، عمق و رطوبت به‌ترتیب ۵/۰۸ کیلومتر بر ساعت، ۲۰ سانتی‌متر و ۱۶/۴۱ درصد برای کمترین نیروی کششی مورد نیاز و کمترین مصرف سوخت، با درصد مطلوبیت ۰/۹۰۴ محاسبه شد.

برای نقاط بهینه عملکردی که در این تحقیق معرفی شد، مصرف سوخت به میزان ۲۵/۰۷ لیتر بر هکتار و نیروی کششی به میزان ۶/۳۹ کیلونیوتن اندازه گیری شد.

در نهایت پیشنهاد می‌شود کاربرد نتایج این تحقیق به‌صورت ارائه دستورالعمل فنی برای کشاورزان و کاربران تراکتور در نظر گرفته شود.

References

1. Abbaspour-Gilandeh, Y., and R. Sedghi. 2013. Prediction of tensile strength and energy requirement for sub-soiling operation using fuzzy logic method. Journal of Agricultural Machinery 3 (2): 104-113. (In Farsi).
2. Abbouda, S. K., A. H. Alhashem, and O. M. Saeed. 2001. The Effect of some operating parameters on field performance of a 2WD tractor. Scientific Journal of King Faisal University (Basic and Applied Sciences) 16: 94-103.
3. Al-Suhaibani, S. A., and A. E. Ghaly. 2010. Effect of plowing depth of tillage and forward speed on the performance of a medium size chisel plow operating in a sandy soil. American Journal of Agricultural and Biological Sciences 5 (3): 247-255.
4. Bukhari, S., J. M. Baloch, G. R. Mari, A. N. Mirani, A. B. Bhuttoand, and M. A. Bhutto. 1990. Effect of different speeds on the performance of moldboard plow. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America 22 (3): 79-82.
5. Darabi, S., M. Behroozi-Lar, E. Ebrahimiand, and B. Karami. 2012. Extraction of fuel consumption changes at the farm level to optimize energy consumption primary plowing in agricultural production. 7th National Congress of Agricultural machinery Engineering and Mechanization, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Farsi).
6. Earl, R. 1997. Assessment of the behavior of field soils during compression. Journal of Agriculture Engineering Research 68: 147-157.

7. Fazeli, M., Y. Abbasspour-Guilandeh, G. Shahgholiand, and M. Noushyar. 2012. Comparison of tensile strength and energy of conventional cultivators. 7th National Congress of Agricultural machinery Engineering and Mechanization, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Farsi).
8. Giri, S. K. and S. Prasad. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. Journal of Food Engineering 78 (2): 512-521.
9. Godwin, R. J. 2007.A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces. Soil and Tillage Research 97: 331-340.
10. Godwin, R. J., M. J. Dogherty, C. Saundersand, and A. T. Balafoutis. 2007. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. Biosystems Engineering 97: 117-129.
11. Harrison, H. P., and W. B. Reed. 1968. Analysis of draft, depth and speed of tillage equipment. Agricultural Engineering International 10 (1): 14-23.
12. Hauck, D., V. Hofmanand, and H. Kucera. 1984. Traction – horsepower demonstration. ASAE Paper No. 84-1061, St. Joseph, MI 49085, U.S.A. 10P.
13. Hemmat, A., and V. I. Adamchuk. 2008. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. Computer and Electronic in Agriculture 63: 89-103.
14. Hosseinzdeh Samani, B., E. Fayyazi, B. Ghobadian, and S. Rostami. 2016. Studying and optimizing the biodiesel production from mastic oil aided by ultrasonic using response surface method. Journal of Agricultural Machinery 6 (2): 440-450. (In Farsi).
15. Janulevicius, A., A. Juostas, and G. Pupinis. 2013. Tractor’s engine performance and emission characteristics in the process of ploughing. Energy Conversion and Management 75 (1): 498-508.
16. Kamakar, S., S. R. Ashrafizadeh, and R. L. Kushwaha. 2009. Experimental validation of computational fluid dynamics modeling for narrow tillage tool draft. Journal of Terramechanics 46: 277-283.
17. Karparvarfard, S. H., and H. Rahmanian-Koushkaki. 2010. Development of fuel consumption equation: Test case for a tractor chisel-ploughing in a clay loam soil. Biosystems Engineering 130: 23-33.
18. Kepner, R. A., R. Bainer, and E. L. Barger. 1987. Principles of farm Machinery. The AVI publishing Co., Inc., Westport, Connecticut. 486 P.
19. Kheiralla, F. A. 2004. Modeling of power and energy requirements for tillage implements operating on Serdang sandy clay loam, Malaysia. Soil and Tillage Research 78: 21-34.
20. Kushwaha, R. L., and Z. X. Zhang. 1998. Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: A review. Journal of Terramechanics 35: 69-86
21. Loghavi, M., and A. Moradi. 1996. Draft and drawbar power requirement of moldboard plow in a clay loam soil. Iran Agricultural Research 15 (2): 203-214.
22. Matthes, R. K. W. F., I. W. Watson, K. Savelle and D. L. Sirois. 1988. Effect of load and speed on fuel consumption of a rubber-tired skidder. Transactions of ASABE 31 (1): 37-39.
23. Mckyes, E. 1985. Soil cutting and tillage. Amsterdam of Holland.368 P.
24. Moitzi, G., H. Weingartmann, and J. Boxberger, 2006. Effects of tillage systems and wheel slip on fuel consumption. Energy Efficiency and Agricultural Engineering. International Scientific Conference Pp. 16-23.
25. Montgomery, D. C. 2008. Design and Analysis of Experiments, 8th edn. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, NJ.725 P.
26. Rashidi, M., I. Najjarzadeh, B. Jaberinasab, S. M. Emadi, and M. Fayyazi. 2013. Effect of soil moisture content, tillage depth and operation speed and draft force of moldboard plow. Journal of Science Research 16 (2): 245-249.
27. Rezapour-Sarabi, M., T. Mesri- Gondoshmian, Y. Abbaspour-Guilandehand A. Ahmadi. 2015. Determining the fuel consumption of the tractor MF6290 in the conventional tillage and no-tillage systems. 9th National Congress of Agricultural machinery Engineering and Mechanization, Tehran University, Tehran, Iran. (In Farsi).
28. Roozbeh, M., and A. Hemmat. 2003. Evaluation and investigation of energy consumption in different tillage methods in corn planting. Journal of Agricultural Science 33: 117-128. (In Farsi).
29. Saunders, M., P. Lewisand, and A. Thornhill. 2000. Research methods for business students. 2nd edition. Harlow: Pearson Education.
30. Sirhan, A., B. Snober, and A. Baltikhi. 2002. Management of primary tillage operation to reduce tractor fuel consumption. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America 33 (4): 9-11.
31. Zhao, X., G. Zhouand, and Q. Tian. 2009. Study on the shear strength of deep reconstituted soils. International Journal of Mining Science and Technology 19: 405-408.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 9, No. 1, Spring - Summer 2019, p. 167-176

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۹، شماره ۱، نیمسال اول ۱۳۹۸، ص ۱۷۶-۱۶۷

Modeling and Optimizing of the Energy Consumption of Moldboard Plow using Response Surface Methodology (RSM)

M. Mehrijani[1]- J. Khodaei[2*]- S. Zareei[2]

Received: 07-07-2017
Accepted: 15-10-2017

Introduction

Tillage as a preliminary step for agricultural production consumes large amounts of energy. Regarding the energy crisis and the greenhouse gas emissions caused by the indiscriminate use of fossil fuels, many efforts have been done to reduce energy consumption as much as possible. About half of the energy used in the crop production has been dedicated to tillage operations; hence the optimization of tillage tools performance can lead to decrease the energy loss. Tillage operation in most regions of Iran is carried out by moldboard plow. The ability of this plow in turning the soil has made it impressively different from the other plows. The energy used in tillage operations depends on various factors such as soil type and its conditions (soil moisture and texture), plow depth and forward speed. The aim of this study is to investigate the effect of forward speed, plow depth and soil moisture on fuel consumption and required tensile force during tillage operation with a moldboard plow which uses three plows in clay soil.

Materials and Methods

The current study was carried out to optimize the tillage operation with a moldboard plow in the clay soil. Tillage experiments were performed to evaluate the effect of forward speed, plow depth and soil moisture content on the required tensile force and tractor fuel consumption. A moldboard plow with three single-sided plows was used to conduct experiments. Two tractors (MF285 and U650) and a dynamometer were used to measure the required tensile force. To measure the fuel consumption of the tractor during operation, the fuel level was measured in a separate tank system installed on the tractor's fuel system.

Experiments were carried out using response surface method and central composite design (CCD) by taking three levels of forward speed (4, 5 and 6 kmh^{-1}), three plow depth (20, 25 and 30 cm) and three levels of soil moisture content (12, 16 and 20%). Design Expert 8.0.6 software was used to analyze the experimental data.

Results and Discussion

The result of the analysis of variance showed that the effects of plow depth, forward speed and soil moisture, as well as the interaction between forward speed and moisture content on the fuel consumption during tillage operations with moldboard plow are significant. The results also indicated that the increase in forward speed decreased the fuel consumption. Also, fuel consumption decreased with increasing in moisture content at first, but then increased. The reason for this was probably because of the increased strength of soil particles due to the reduced moisture content (the stronger coherence force between the particles), which required more energy to shear the soil.

According to the results of analysis of variance, it can be concluded that all three factors of forward speed, plow depth and soil moisture had a significant effect on the required tensile force of moldboard plow at %1 probability level. With increasing the plow depth and forward speed, required tensile force increased significantly. The dependent variables were modeled as second order regression equations and optimal values of independent variables were determined. Optimum performance with maximum desirability was determined at forward speed of 5.08 kmh^{-1}, plow depth of 20 cm and soil moisture content of 16.41%.

Conclusions

With increasing plow depth, tensile force and fuel consumption increased. Also, tensile force increased with increasing forward speed, but this increase was not severely affected by the plow depth and reduced the fuel consumption. The quadratic regression models can well predict the required tensile force and fuel consumption. Using response surface method, optimum performance was determined at forward speed of 5.08 kmh^{-1}, plow depth of 20 cm and soil moisture content of 16.41%.

Keywords: Fuel consumption, MF285tractor, Optimization, Regression model, Tensile force

1- Graduated M.Sc. student in Biosystems Engineering Department, University of Kurdistan
2- Assistant Professor in Biosystems Engineering Department, University of Kurdistan
(*- Corresponding Author Email: J.khodaei@uok.ac.ir)